



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**“Determinación del coeficiente de conductividad
térmica del concreto con aditivo de poliuretano
residual”**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Angel de Jesús EGOAVIL ROSAS

ASESOR

César Alejandro QUISPE GONZÁLES

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Egoavil, A. (2018). *“Determinación del coeficiente de conductividad térmica del concreto con aditivo de poliuretano residual”*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

DEDICATORIA

A mis padres, porque ellos siempre están a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para
hacer de mí una mejor persona.

A mis compañeros y amigos, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento,
alegrías y tristezas.

.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por haberme dado la oportunidad de ser parte de ella y abrirme las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera, así como a cada uno de mis profesores que me brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante.

RESUMEN

El desarrollo de la presente tesis supone la mejora del aislamiento térmico de una mezcla de concreto mediante el empleo de residuos de placas de poliuretano, al que podemos definir como un conjunto de materiales y técnicas de instalación que se aplican en los elementos de construcción para limitar un volumen de control y reducir su transferencia de calor. En tal sentido, este trabajo desarrolla cálculos de transmisión de calor de elementos de construcción.

Palabras clave: aislamiento térmico, Poliuretano, transferencia de calor, volumen de control.

Abstract

The development of the present thesis supposes the improvement of the thermal insulation of an armed structure through the use of Polyurethane waste, which can be defined as a set of materials and installation techniques that are applied in the construction elements to limit a control volume and reduce its heat transfer. In this regard, this work develops a calculation of heat transmission in building elements.

Keywords: thermal insulation, polyurethane, heat transfer, control volume.

PREFACIO

La razón principal por la que opte por realizar el presente tema es debido a que actualmente laboro en una empresa que brinda servicios de cadena de frio; en el área de calificaciones hemos empezado a innovar en el mercado farmacéutico al implementar cajas de poliuretano mediante el uso de un CNC (Control Numérico Computarizado) para el diseño de embalajes térmicos dándonos mejores resultados que emplear las cajas de poliestireno expandido (EPS) que son los más comerciales. El poliuretano al ser un material 40% más termoaislante que el Poliestireno nos ha dado muy buenos resultados y ha podido satisfacer las necesidades de nuestros clientes.

Pero la problemática reside al constatar que la merma, que se deja después de realizar la producción de estas cajas, no cuenta con una gestión de residuos de parte de la empresa. Esto me conlleva a considerar darle un nuevo empleo a esta merma en el mezclado de concreto para elaboración de concreto ligero, y mediante el uso de los conocimientos brindados a lo largo de mi carrera, comprobar la minimización de la transmisión de calor en comparación de un concreto simple.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL.....	12
1.1. Introducción	12
1.2. Antecedentes del estudio.....	13
1.3. Problemática y problema a solucionar.	14
1.4. Justificación.....	15
1.5. Objetivos de la tesis.....	16
1.5.1. Objetivo General.	16
1.5.2. Objetivos específicos.	16
1.6. Hipótesis.....	17
1.7. Variables.....	17
1.8. Limitaciones.....	17
2. CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEORICOS	18
2.1. El concreto.....	18
2.1.1. Características.	18
2.1.2. Componentes del concreto.	19
2.1.3. Propiedades del concreto.	24
2.1.4. Tipos de concreto.	27
2.1.5. Fases de la producción del concreto.	29
2.2. El poliuretano.....	33
2.2.1. Propiedades.	33
2.2.2. Propiedades mecánicas.	34
2.2.3. Resistencia a los productos químicos.	34
2.2.4. Aplicaciones.	34
2.3. Concreto Ligero.....	37
2.3.1. Definición.	37
2.3.2. Ventajas y desventajas.	37
2.3.3. Clases de Concreto Ligero.	38
2.3.4. Morteros ligeros con materiales tradicionales.	40
2.3.5. Morteros ligeros con residuos industriales.	41
2.3.6. Morteros modificados con polímeros.	41
2.3.7. Morteros aligerados con residuos poliméricos.	42
2.3.8. Morteros aligerados con merma de poliuretano.	43
2.4. La conductividad térmica	47
2.4.1. Definición.	47
2.4.2. Conductividad térmica para gases poliatómicos.	51
2.4.3. Para una mezcla de gases.	51
2.4.4. Conductividad térmica en sólidos.	51
2.4.5. Conductividad térmica en líquidos.	52
2.4.6. Conducción.	52

2.4.7. Simplificación de la conducción (Método de las resistencias).	53
2.4.8. Conductividad térmica en elementos de construcción.	54
2.5. Medición de la conductividad térmica	57
2.5.1. Aparato de placa caliente con guarda.	58
3. CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TEMA	60
3.1. Condiciones iniciales	60
3.2. Datos iniciales	62
3.3. Metodología del calculo	62
3.3.1. Dosificación de la mezcla.	62
3.3.2. Revisión del equipo.	63
3.3.3. Preparación de la muestra.	63
3.3.4. Realización del ensayo.	63
3.4. Cálculos de ingeniería	67
3.5. Análisis de los resultados	74
3.6. Metrado	75
3.7. Análisis de costos	76
4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES	77
5. CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	79
ANEXOS	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. La formación del concreto.....	18
Figura 2.2. Segregación del concreto.....	25
Figura 2.3. Exudación de una muestra de concreto	26
Figura 2.4. Un sistema automático de bombeo de concreto	31
Figura 2.5. Proceso de curado para mantener una temperatura y humedad adecuado.	32
Figura 2.6. La espuma de poliuretano como aislante.....	38
Figura 2.7. Ventajas de aislamiento termico del poliuretano.....	38
Figura 2.8. Conductividad térmica de los materiales aislantes más comunes en edificación.....	38
Figura 2.9. Clasificación del concreto ligero.	38
Figura 2.10. Espuma de poliuretano empleado en la construcción.....	44
Figura 2.11. Cuadro porcentual de las aplicaciones del poliuretano.	46
Figura 2.12. Conducción de calor a través de una pared plana grande.....	47
Figura 2.13. Esquema representativo del flujo de calor a través de una superficie	50
Figura 2.14. Resistencias en serie.	54
Figura 2.15. Equipo con placa caliente para obtener coeficiente de conductividad térmica	55
Figura 2.16. Cámara de aislamiento térmico.	56
Figura 2.17. Componentes principales para medir la conductividad térmica.....	58
Figura 3.1. Equipo para medir la conductividad térmica de materiales solidos aislantes. (APCG)	62
Figura 3.2. Relación en peso de los componentes de la mezcla que se empleara en la prueba.	65
Figura 3.3. Conductividad térmica del concreto ligero con merma de Placas de Poliuretano en función de su temperatura media	67
Figura 3.4. Conductividad térmica del concreto ligero con merma de placas de poliuretano en función de su temperatura máxima.....	72
Figura 3.5. Comparación de la conductividad térmica entre el concreto ligero con merma de placas de poliuretano y el concreto simple en función de su temperatura mínima	73
Figura 3.6. Metrado del conglomerado de concreto con merma de placas de poliuretano.....	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Componentes del Cemento Portland.....	20
Tabla 2.2. Concentración máxima de partículas en el agua.....	20
Tabla 2.3. Distribución de tamaños de las partículas de arena	21
Tabla 2.4. Graduado del agregado grueso	22
Tabla 2.5. Trabajabilidad y consistencia del concreto	24
Tabla 2.6. Densidad y resistencia del concreto ligero.	39
Tabla 2.7. Coeficiente de conductividad térmica del poliuretano	45
Tabla 2.8. Coeficiente de conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente	49
Tabla 3.1. Informe de la cantidad en gramos de los elementos emplea en la mezcla.....	68
Tabla 3.2. Variación de temperaturas de los ensayos.	68
Tabla 3.3. Informe de medición de la placa de concreto ligero con merma placas de poliuretano.	69
Tabla 3.4. Resultados de la conductividad térmica para la muestra de concreto ligero con merma de placas de Poliuretano.....	72
Tabla 3.5. Análisis de precios de 2 placas de concreto ligero con merma de poliuretano	76

LISTA DE ABREVIATURAS

Símbolo	Descripción	Unidades
CNC	: Control numérico por computador	
EPS	: Poliestireno expandido	
APCG	: Aparato de Placa Caliente con Guarda	
NTP	: Normas técnicas peruanas	
ITINTEC	: Instituto Nacional de Investigación Tecnológica y Normas Técnicas	
ASTM	: American society for testing materials	
$f'c$: La resistencia a la compresión de un concreto	
PCM	: Polymer cement mortar	
PET	: Politereftalato de etilo	
EVA	: Polietilvinilacetato de etilo	
k	: Conductividad térmica	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
R	: Resistencia térmica	$m^2 \cdot K/W$
e	: espesor	m
Cp	: Capacidad calórica a presión constante	$kJ/kg \ ^\circ C$
$C_{v,el}$: Contribución electrónica	
n_e	: Es número de electrones por cm^3	
ϵ_F	: Es la energía de Fermi	

α	: Es el coeficiente de difusiva térmica	$\frac{m^2}{s}$
RTD	: Detector de temperatura resistivo	
PU	: Poliuretano	
Q	: Calor aportado al sistema	J
T_m	: Temperatura media	°C
A	: Área	m^2
d_{arena}	: Densidad de la arena	kg/m^3
v_{arena}	: Volumen de la arena	m^3
d_{PU}	: Densidad del poliuretano	kg/m^3
v_{PU}	: Volumen del poliuretano	m^3
m_{PU}	: Masa del poliuretano	kg

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Introducción

La presente tesis determinara el coeficiente de conductividad térmica de una mezcla de concreto ligero con residuos de placas de poliuretano como agregado fino. La medición de la conductividad térmica y su estudio nació en Estados Unidos y en Alemania alrededor de los años 1910.

La normalización de la medición de propiedades térmicas cobro gran importancia por su influencia directa en el ahorro energético. En consecuencia, varios países consideran la importancia de su medición por las razones ya conocidas, por lo cual se emplean equipos de medición diseñados para llevar a cabo los ensayos.

La utilización de los residuos de placas de poliuretano como agregado fino a nuestra mezcla de concreto ligero, brindara buenas cualidades de aislamiento térmico, resistencia al fuego y durabilidad. Asimismo, posibilitara la reducción de costos al emplear menos arena en la elaboración del mortero.

Los trabajos de campo y elaboración del estudio se desarrollaron en el laboratorio de física de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

1.2. Antecedentes del estudio.

1.2.1. Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane

foam. Junco y Gadea (2012), publicaron un artículo en ELSEVIER donde examinan morteros de albañilería hechos con cemento portland, arena, agua y espuma blanca reciclada de poliuretano proveniente de residuos industriales. Se prepararon diferentes tipos de mezclas, mediante la sustitución de diferentes cantidades de arena por volúmenes equivalentes de poliuretano y luego, con diferentes proporciones de cemento / agregados.

Los morteros analizados en ese estudio tenían una densidad aceptable tanto en estado fresco como en estado endurecido. La densidad disminuyó progresivamente con la inclusión de espuma de poliuretano. La espuma de poliuretano puede reducir excesivamente algunas características de los morteros ligeros, especialmente la resistencia mecánica.

1.3. Problemática y problema a solucionar.

En contexto histórico, el concreto ha sido el material más empleado para la elaboración de edificaciones y obras civiles; conllevando a que sea un objeto de estudio que ha ido adaptando su composición y modificando su estructura para que cumpla los nuevos requerimientos y especificaciones solicitadas. Sin embargo, en las últimas décadas el aislamiento térmico ha sido una de las propiedades más requeridas en las edificaciones por la necesidad de mantener una temperatura estable en ambientes cerrados. En consecuencia, se han estado empleando equipos de aire acondicionado y/o sistemas de calefacción conllevando a un gasto energético elevado y mayor emisión de CO₂ a la atmosfera agravando el calentamiento global.

Esto ha conllevado a desarrollar procesos para obtener concretos porosos de baja densidad mediante el empleo de agregados artificiales expandidos y/o desechos industriales procesados para así reducir el coeficiente de conductividad térmica. Esto implica, darles un nuevo uso a los residuos sólidos industriales y optimizar los recursos del constructor.

Uno de los residuos industriales más pesados y voluminosos es la que deja la producción y empleo del Poliuretano, debido a que juega un papel muy transcendental en el sector de construcción, cadena de frío, soluciones térmicas en base a aislación por reflexión, etc.

De acuerdo al informe del estado actual de la gestión de los residuos sólidos municipales en el Perú (año 2010/2011), se generen al día 20.000 toneladas de ellos el 9.48% (plástico donde está incluido el Poliuretano). Según la ley General de Residuos Sólidos, son los gobiernos locales los que tienen la misión de orientar a la población hacia el uso de las buenas prácticas en el manejo de residuos. Dicho enfoque no toma en cuenta la complejidad del problema. Conllevando a que las futuras opciones de recuperación necesiten ser sólidos, económicas y capaces de tratar residuos mezclados.

Viendo las altas demandas de aislamiento térmico en materiales de construcción y que las opciones de reciclado del poliuretano no son bien gestionadas, he optado por el empleo de la merma de placas de poliuretano como agregado para poder producir concreto ligero y así poder contrastar las ventajas termoaislantes en comparación del concreto simple.

1.4.Justificación.

En la actualidad los países desarrollados y en vía de desarrollo buscan maneras alternativas de reciclar residuos de construcción como es el caso del poliuretano. Sin embargo, no tienen en cuenta la complejidad del problema al ser productos intermedios.

Este proyecto de investigación tiene como fin aportar, una solución de reciclado de residuos de poliuretano en la elaboración de un concreto que le dé mayor eficiencia a su aislamiento térmico. El problema actual en muchas zonas del país, a veces están sujetas a temperaturas extremas, caso del frío, o en caso de zonas tórridas donde el calor es un factor a regular en las edificaciones. En el caso de zonas calientes, el empleo de este tipo de concreto nos permitiría mantener la temperatura estable y no habría necesidad de emplear equipos de aire acondicionado conllevándonos a un gasto adicional por el consumo energético necesario para su funcionamiento. En el caso de zonas frías, la mejora de la resistividad térmica puede ayudar a mantener una habitación en mejores condiciones que si el material fuera buen conductor.

1.5. Objetivos de la tesis.

1.5.1. Objetivo General.

Determinar el coeficiente de conductividad térmica de un conglomerado de concreto ligero con aditivos de poliuretano residual mediante pruebas en laboratorio.

1.5.2. Objetivos específicos.

Entre los objetivos específicos se pueden mencionar:

1. Asegurar la correcta elaboración de la probeta de concreto ligero para su posterior análisis.
2. Realizar análisis térmicos en el laboratorio de Física de la PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú) de la muestra de concreto ligero con el fin de obtener el coeficiente de conductividad térmica mediante el método de la placa caliente/muestra/placa fría con un sistema de aislamiento.
3. Realizar un análisis comparativo entre los valores de conductividad térmica que se obtendrán en el laboratorio con los teóricos del concreto simple.

1.6.Hipótesis.

¿Es posible emplear residuos de poliuretano como aditivo para mejorar su aislamiento térmico en comparación de un concreto simple? El mayor beneficio que brinda los desechos industriales como el poliuretano al concreto es su alto poder de aislamiento térmico y acústico, su facilidad de manejar debido a su peso reducido y la proliferación de pequeñas porosidades formadas en el secado. La porosidad es un factor que define las características térmicas, la absorción y el contenido de humedad de los concretos ligeros. Los concretos con porosidades pequeñas son preferibles en virtud de que así se logra mayor resistencia y aislamiento térmico. Se espera ratificar esta hipótesis con los resultados que se obtengan de las pruebas en laboratorio.

1.7.Variables.

Para el presente trabajo, se tomará como variable principal el coeficiente de conductividad térmica. Las variables secundarias son muchas. El diseño teórico de las palas está en función de la masa de poliuretano a emplear en los placebos, volumen de arena a remplazar, temperatura media, potencia disipada durante la prueba, la resistencia térmica y el espesor de las muestras.

1.8.Limitaciones.


El presente trabajo de investigación solo se abocará a determinar el coeficiente de conductividad térmica del concreto con aditivo de poliuretano residual, en donde se utilizarán conceptos de termodinámica. No se abarcarán temas relacionados a impacto ambiental, costos, cálculos de resistencia y otros no relacionados a la parte principal del tema.

2. CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEORICOS

En el capítulo anterior se mostró los aspectos generales de la tesis, problemática y problemas a solucionar y sus objetivos. En este capítulo se expondrá el marco teórico bajo el cual será realizada la experimentación del concreto y su variación en la composición, concreto con merma de poliuretano, de forma que se pueda analizar su coeficiente de conductividad térmica.

2.1. El concreto

El concreto es una mezcla de cemento Portland, agregados, aire y agua en proporciones adecuadas, tal como se puede observar en la Fig. 2.1, para obtener ciertas propiedades previstas como la resistencia.



CONCRETO = CEMENTO PORTLAND + AGREGADOS + AIRE + AGUA

Figura 2.1. La formación del concreto.

Fuente: Tecnología del concreto, Copyright 1997 por Flavio Abanto.

El cemento y el agua reaccionan químicamente uniendo las partículas de los agregados, formando un material heterogéneo. En algunos casos, se añaden aditivos que mejoran o modifican algunas propiedades del concreto.

2.1.1. Características. Entre los factores que hacen del concreto un material de construcción universal tenemos:

Ventajas

- a) La facilidad de moldearse dentro de los encofrados de casi cualquier forma aun en estado plástico.

- b) Su alta resistencias a la compresión que lo hace adecuado para elementos sometidos principalmente a compresión, casos como columnas y arcos.
- c) Su alta resistencia al fuego y a la penetración del agua.

Desventajas

- a) En la mayoría de los casos el concreto se prepara en el sitio en condiciones donde no hay un responsable absoluto de su producción que vele por el control de calidad.
- b) El concreto es un material de escasa resistencia a la tracción. Para solucionar su limitación se utiliza el acero. La combinación de ellos se conoce como concreto armado.

2.1.2. Componentes del concreto.

2.1.2.1. Ligantes.

2.1.2.1.1. Cemento Portland. Es un aluminio silicato de calcio, patentado por J. Aspdin en 1824, recibe ese nombre por una piedra que abunda en Inglaterra. El cemento Portland es un clincker molido, producido por la cocción a elevadas temperaturas, de mezclas de cal, alúmina, fierro y sílice. Dicho cemento es un producto de fácil adquisición que, al contacto del agua, tiene la propiedad de reaccionar lentamente y formar una masa endurecida.

Tabla 2.1. Componentes del Cemento Portland

Componente	Abreviación	Formula Química	Concentración Típica / %
Silicato Tricálcico	C ₃ S	3CaO • SiO ₂	60-70%
Silicato Dicálcico	C ₂ S	2CaO • SiO ₂	10-20%
Aluminato Tricálcico	C ₃ A	3CaO • Al ₂ O ₃	5-10%
Alumino Ferrato Tetracálcico	C ₄ AF	4CaO • Al ₂ O ₃ • Fe ₂ O ₃	3-8%

Fuente: The Manufacture of Portland Cement, 1988.

2.1.2.1.2. *Agua*. Es un elemento de gran importancia en la elaboración del concreto, ya que está relacionado con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del concreto endurecido. Al ser considerada como una materia prima para la confección y el curado del concreto u hormigón debe cumplir determinadas normas de calidad como las detalla NTP -339.088. El agua deberá ser limpia y fresca hasta donde sea posible y no contener residuos. Los límites máximos permitidos de concentración de sustancias en el agua:

Tabla 2.2. Concentración máxima de partículas en el agua

Sustancias y Ph	Límite Máximo
Cloruros	300 ppm
Sulfatos	200 ppm
Sales de magnesio	125 ppm
Sales Solubles	300 ppm
Sólidos en suspensión	10 ppm
Materia Orgánica expresadas en oxígeno consumido	0.001 ppm
Ph	6 < Ph < 8

Fuente: Norma de calidad NTP 339.088, 2015.

2.1.2.2. Agregados. Conocidos también como áridos, que se mezclan con el cemento, cal y el agua formando los concretos y morteros. La importancia de los agregados radica en que forman parte del 75% en volumen, de una mezcla común de concreto.

2.1.2.2.1. Agregado fino. Se le considera a la fracción que pase por la malla de 4.75 mm.

Proviene de arenas naturales o de la trituración de piedras naturales. El porcentaje de piedra natural triturada no puede exceder más de treinta por ciento del agregado fino.

Granulometría: Es la distribución por tamaños de las partículas de arena, dichas distribuciones del tamaño de partículas son determinadas por separación con una serie de mallas normalizadas en el ITINTEC 400.037.

Tabla 2.3. Distribución de tamaños de las partículas de arena

MALLA		PORCENTAJE QUE PASA (ACUMULATIVO)
3/8"	9.5 mm	100
N°4	4.75 mm	95 a 100
N°8	2.36 mm	80 a 100
N°16	1.18 mm	50 a 85
N°30	600 µm	25 a 60
N°50	300 µm	10 a 30
N°100	150 µm	2 a 10

Fuente: ITINTEC 400.037, 2002.

2.1.2.2.2. Agregado grueso. Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz ITINTEC 4.75 mm (N°4) provenientes de la destrucción natural o mecánicas de las rocas que contemplen los límites establecidos en la norma ITINTEC 400.037. Algunos ejemplos de agregado grueso son la grava, piedra chancada, etc.

Grava: Las gravas comúnmente llamadas “canto rodado”, es el conjunto de fragmentos de piedras pequeñas, cuyo origen trasciende de la desintegración natural de las rocas, por acción del hielo, y otros agentes atmosféricos. Las gravas pesan de 1600 a 1700 kg/m³.

Piedra Chancada: Es la desintegración artificial de la roca o grava. Su función principal es la de dar volumen y aportar su propia resistencia al concreto. El peso de la piedra chancada se estima en 1450 a 1500 kg/m³.

Granulometría: El agregado grueso deberá estar graduado dentro de los límites establecidos en la Norma ITINTEC 400.037 o en la norma ASTM C 33.

Tabla 2.4. Graduado del agregado grueso

Tamaño nominal	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), % en peso												
	4" 100 mm	3 1/2" 90 mm	3" 75 mm	2 1/2" 63 mm	2" 50 mm	1 1/2" 37.5 mm	1" 25.0 mm	3/4" 19.0 mm	1/2" 12.5 mm	3/8" 9.5 mm	No. 4 4.75 mm	No. 8 2.36 mm	No. 16 1.18 mm
3 1/2" a 1 1/2"	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5					
2 1/2" a 1 1/2"	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5					
2" a No. 4	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30 I	-	0-5		
1 1/2" a No. 4	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30 I	0-5		
1" a 3/4"	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40 I	0-15	0-5		
1" a No. 4	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	
3/4" a No. 4	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	
2" a 1"	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5				
1 1/2" a 3/4"	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5			
1 a 3/4"	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5			
3/4" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5		
1 1/2" a No. 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	
3/8" a No. 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30 I	0-10	0-5

Fuente: ITENEC 400.037, 2002.

2.1.2.3. Aditivos. Se denominan aditivos a las sustancias añadidas al concreto con el propósito de alterar alguna de sus propiedades y hacerlo mejor para su respectivo fin.

Razones principales para su uso

- Reducción del costo de la construcción de concreto.
- Obtención de propiedades específicas en el concreto de una forma mucho más efectiva.

- Aseguramiento de la calidad del concreto en las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado.
- Reducir la exudación y sangrado
- Reducir la contracción.
- Mejorar la adherencia del concreto viejo y nuevo.

2.1.2.3.1. Tipos de aditivos.

- a) Plastificante: Este aditivo permite emplear menos agua en la mezcla de concreto para obtener mucho más rápido la consistencia requerida.
- b) Retardador: Este aditivo permite demorar el fraguado del concreto.
- c) Acelerador: Este aditivo permite acelerar el fraguado y la ganancia de resistencia.
- d) Plastificante y retardador: Este aditivo permite emplear menos agua para obtener la consistencia requerida y a su vez demorar el fraguado en la mezcla de concreto.
- e) Plastificante y acelerador: Este aditivo permite emplear menos agua para obtener la consistencia requerida y a su vez acelerar el fraguado en la mezcla de concreto.
- f) Incorporadores de aire: Aumentan la resistencia del concreto a la acción de las heladas mediante de la introducción de burbujas de diminutas. Dichas burbujas funcionan como amortiguadores a los esfuerzos inducidos por las heladas.
- g) Adhesivos: Mejoran la adherencia con el refuerzo.

2.1.3. Propiedades del concreto.

2.1.3.1. Trabajabilidad y consistencia.

2.1.3.1.1. *Trabajabilidad.* Es la ventaja que tiene el concreto fresco para poder ser mezclado, colocado, compactado y acabado sin pasar por segregación y exudación durante este proceso.

2.1.3.1.2. *Consistencia.* Definida por el grado de humedecimiento de la mezcla, que depende fundamentalmente por la cantidad de agua suministrada.

Tabla 2.5. Trabajabilidad y consistencia del concreto

Consistencia	Trabajabilidad	Método de Compactación
Seca	Poco trabajable	Vibración Normal
Plástica	Trabajable	Vibración ligera
Fluida	Muy trabajable	Chuseado

Fuente: Tecnología del Concreto, 1997.

2.1.3.2. *Segregación.* Es un fenómeno de la consistencia del mezclado de descomponerse a sus partes constituyentes como el agregado grueso, siendo de mayor riesgo cuando es más húmeda y menor cuando más seca lo es. Es un fenómeno perjudicial para el concreto, ya que produce llenados, bolsones de piedra, capas arenosas, cangrejas, etc. Es peligroso llenar un encofrado o un molde con un material en estas condiciones ya que hace al concreto más débil, menos durable, y dejara un acabado pobre. Generalmente procesos inadecuados de manipulación y colocación son las principales razones de segregación en la mezcla. Este fenómeno se puede apreciar en la Fig.2.2.



Figura 2.2. Segregación del concreto

Fuente: ITINTEC 400.037, Copyright 2002 por INDECOPI.

2.1.3.3. Resistencia. La resistencia del concreto no se puede comprobar en condiciones plásticas, por lo que el procedimiento adecuado consiste en tomar muestras durante el mezclado las cuales después de curadas se pueden someter a pruebas de compresión. Se usa la resistencia a la compresión por su facilidad en el desarrollo de los ensayos. La resistencia en compresión del concreto es la carga máxima soportada en una unidad de área soportada por una muestra, antes que falle por algún agrietamiento o rotura. La resistencia a la compresión de un concreto (f'_c) debe ser alcanzada al día 28, después del vaciado y su curado respectivo.

2.1.3.3.1. Factores que afectan la resistencia.

- a) **La relación agua – cemento (a/c):** La relación a/c, afecta la resistencia a la compresión del concreto con o sin aire incluido. La resistencia disminuye cuando la relación a/c incrementa.
- b) **El contenido de cemento:** La resistencia del concreto disminuye cuando la cantidad de cemento disminuye en la mezcla.

- c) **El tipo de cemento:** La resistencia varía para los concretos hechos con diferentes tipos de cemento.
- d) **Las condiciones de curado:** Debido a que las reacciones de hidratación del cemento solo se dan con una cantidad determinada de agua, se debe mantener la humedad en el concreto durante el periodo de curado, con el propósito de incrementar su resistencia con el tiempo.

2.1.3.4. Exudación. Se llama exudación al ascenso de una porción de agua de la mezcla hacia la superficie debido a la sedimentación de los sólidos. La exudación puede ser consecuencia de una mala dosificación de la mezcla, exceso de agua, utilización de aditivos, y de la temperatura, ya que a mayor temperatura mayor la velocidad de exudación. La exudación es perjudicial para el concreto, ya que gracias a esto la superficie de contacto durante la colocación de una capa sobre otra puede disminuir su resistencia debido a un aumento de la relación agua –cemento. Como consecuencia del ascenso de una porción de agua del mezclado, se puede obtener un concreto poroso y poco durable.



Figura 2.3. Exudación de una muestra de concreto

Fuente: Propiedades del concreto. Copyright por Juan Carlos Velandia Salcedo.

2.1.3.5. Durabilidad. El concreto debe ser capaz de resistir la intemperie, reacción a productos químicos y desgaste, a los cuales será sometido en el servicio. La mayoría de los daños causados por la intemperie al concreto se deben a los ciclos de congelación y descongelación. Para estos casos se opta emplear aditivos de inclusores de aire que benefician aumentando la impermeabilidad. La resistencia al desgaste se logra con un concreto denso, de alta resistencia, hecho con agregados duros.

2.1.3.6. Impermeabilidad. Es una propiedad importante del concreto que puede mejorarse reduciendo la cantidad de agua en la mezcla. Ya que el incremento de agua en la mezcla deja vacíos y cavidades después de la evaporación. La incrementación de aditivos de inclusión de aire, así como un curado adecuado por un largo tiempo, aumentan la impermeabilidad.

2.1.4. Tipos de concreto.

2.1.4.1. Concreto simple. Se define a la mezcla del Cemento Portland, agua, agregado fino y agregado grueso, las cuales no contienen algún tipo de refuerzo. Mayormente este tipo de concreto se emplea en elementos apoyados al suelo o soportados por otros elementos estructurales. Se empleará principalmente en estructuras enterradas, arcos, muros de gravedad, entre otros.

2.1.4.2. Concreto armado. Se define al concreto armado al concreto simple + acero de refuerzo, su empleo es necesario cuando su elemento estructural será sometido a esfuerzos de tracción (tensión) y compresión. Básicamente es necesario incluir un área de acero para poder soportar dichos esfuerzos.

2.1.4.3. Concreto estructural. Se define como al concreto de alta calidad que satisface las especificaciones más rigurosas de los estatutos de construcción para zonas sísmicas.

Este concreto garantiza una resistencia mínima pre-establecida en el diseño y una durabilidad adecuada.

2.1.4.4. Concreto ciclope. Se define al concreto simple en cuya mezcla se coloca piedras desplazadoras de 10" que ocupan el 30 % del volumen total y que no contienen armaduras.

2.1.4.5. Concreto ligero. Es un concreto parecido al concreto de peso normal, excepto que tiene una densidad menor. Tiene una masa volumétrica seca al aire que varía de 1350 a 1850 kg/m³ y una resistencia a compresión a los 28 días que supera los 17 MPa (180 kg/cm²).

2.1.4.6. Concreto pesado. Son preparados utilizando agregados pesados, alcanzando el peso unitario valores entre 2800 a 6000 kg/m³. Es el concreto tradicional por su densidad elevada y poco volumen. Por sus características, constituyen la solución más efectiva en blindaje contra la emisión de partículas radiactivas de los rayos x y rayos gama.

2.1.5. Fases de la producción del concreto. El concreto se produce por diversas formas, manualmente, industrialmente, pero siempre se va repetir los mismos pasos para preparar concreto. Las principales fases de la producción del concreto:

2.1.5.1. Dosificación. La Norma Técnica Peruana indica que la dosificación debe permitir la trabajabilidad del concreto y que la consistencia permita colocar el concreto de manera que sea homogénea, sin generar segregación o exudación excesiva. (Cfr. INDECOPI RNE E060 2009:28)

2.1.5.2. Mezclado. El mezclado del concreto tiene por objetivo cubrir la superficie de los agregados con la pasta de cemento, produciendo una masa homogénea.

2.1.5.3. Equipo usado. El equipo que se emplea en el mezclado de concreto son mezcladores de ejes horizontales/verticales que están disponibles en diferentes capacidades.

2.1.5.4. Procedimiento para cargar la mezcladora. Lo recomendable es colocar primero en el tambor de la mezcladora 10% de agua de mezcla, luego añadimos los agregados conjuntamente con el 80 % del agua. El 10% restante de agua se introduce cuando todos los materiales se encuentran en la mezcladora.

2.1.5.5. Tiempo de mezclado. La duración del mezclado se inicia a partir del instante que todos los componentes de la mezcla se encuentran en el tambor hasta la descarga de la misma. El tiempo varía con respecto a la eficiencia de la mezcladora, pero se considera un minuto y medio el tiempo recomendado.

2.1.5.6. Transporte. El concreto tiene que ser desplazado desde la mezcladora hasta su ubicación final en la estructura tan rápido como sea posible con el fin de evitar la segregación o pérdida de materiales.

2.1.5.7. Equipo utilizado. El concreto puede ser transportado por carretillas, canaletas, fajas transportadoras, elevadores, bombas y latas. La decisión del método a emplear depende de la cantidad de concreto a transportar, la distancia o el presupuesto económico. Las demandas de un buen transporte son:

- a) No debe ocurrir segregación.
- b) No debe ocurrir perdidas de materiales
- c) La capacidad de transporte tiene que ser igual al concreto a colocar.

2.1.5.7.1. Carretillas. Los expertos recomiendan que este equipo debería contar con ruedas de jebe, ser conducidas por superficies suaves y rígidas, lo que se puede conseguir mediante el empleo de tablas donde correrá la carreta.

2.1.5.7.2. Canaletas. Tienen que ser metálicos, con una pendiente adecuada que permita que resbale el concreto (60° con la horizontal). Según los expertos, el empleo de canaletas no es recomendable para usarlo como sistema de transporte debido a que producen segregación y secado de la mezcla de concreto.

2.1.5.7.3. Fajas transportadoras. Son un sistema de transporte continuo que se mueve entre dos tambores. Dicha banda es arrastrada por la fricción de los tambores, quienes son accionados por su motor. El uso principal de las fajas transportadoras es la de transportar materiales granulados, agrícolas e industriales, cemento, etc. Al igual que las canaletas presentan segregación y secado de la mezcla de concreto.

2.1.5.7.4. Elevadores. Llamadas también montacargas o winches, algunos permiten subir el concreto mediante carretillas, otras de dimensiones menores suben cubos de concreto. Se escoge el sistema más apropiado.

2.1.5.8. Bombeo. Es un método eficaz para transportar concreto, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) No bombear concreto con menos de 3'' de asentamiento, ya que sino la mezcla segregará y la tubería se obstruirá.
- b) No bombear concreto con menos de 7 bolsas de cemento por m^3 . Ya que el cemento funciona como lubricante y si se usa por debajo de esta la tubería se obstruirá.
- c) Antes de iniciar el bombeo del concreto, debe lubricarse la tubería.
- d) La obstrucción de la tubería se puede dar por:
 - Bolsas de aire.
 - Concreto muy seco o muy fluido.
 - Falta de arena en el concreto.
 - Concreto dejado demasiado tiempo en la tubería.
 - Escape de lechada por las uniones de la tubería.

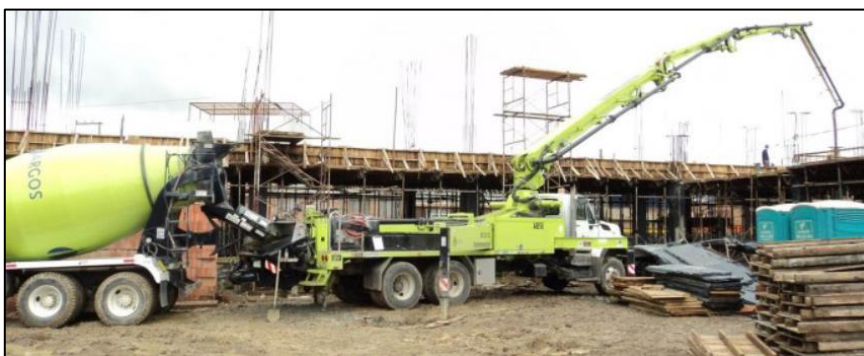


Figura 2.4. Un sistema automático de bombeo de concreto

Fuente: Equipos para bombeo en concreto. Copyright por Eduardo Claros.

2.1.5.9. Lata. Este tipo de transporte de concreto, solo debe efectuarse en obras pequeñas ya que originan segregaciones.

2.1.5.10. Compactación. El mejor sistema actualmente conocido es la vibración. La vibración no hace más fuerte al concreto, ni más resistente a agentes externos, pero te permite trabajar con mezclas más secas y menos trabajables. El objetivo de la compactación es eliminar la mayor cantidad posible de aire.

2.1.5.11. Curado. Es un proceso que consiste en mantener húmedo al concreto por varios días después de su colocación, con la finalidad de permitir la reacción entre el cemento y el agua llamada hidratación del cemento. Si el concreto se llegara a secar rápidamente se producirían rajaduras superficiales y esto a su vez impide que alcance su resistencia específica. Los factores más perjudiciales son el sol y el viento. El 30% o más de la resistencia se puede perder por un secado prematuro del concreto o si la temperatura baja a 5°C o menos durante los primeros días.

La congelación del concreto reduce hasta un 50% su resistencia específica. Para evitar estos problemas, el concreto debe protegerse de las pérdidas de humedad durante los 7 primeros días, y en trabajos más delicados hasta 14 días.



Figura 2.5. Proceso de curado para mantener una temperatura y humedad adecuado.

Fuente: ¿Cómo se hace el curado del concreto?
Copyright por Eduardo Claros.

2.2.El poliuretano.

Es un polímero que mediante un proceso combinado de condensación de bases hidroxilicas con diisocianatos. Se clasifican en dos grupos debido a su comportamiento frente a la temperatura, poliuretanos termoestables y poliuretanos termoplásticos. Los poliuretanos termoestables mas comunes son las espumas que son empleadas como aislantes térmicos y resilentes; por otro lado, los poliuretanos termoplásticos mas comunes son los empleados en estomeros, suelas de calzado, pinturas, etc.



Figura 2.6. Espuma de poliuretano.

Fuente: La espuma de poliuretano como aislante
Fuente: UNIMAQ.

2.2.1. Propiedades. El poliuretano presenta las siguientes propiedades:

- Tiene un coeficiente de conductividad térmica muy baja, mucho menor que la de los aislantes tradicionales.
- El empleo de equipos apropiados permite la realización “in situ”, permitiendo acelerar la ejecución de una obra.
- Si se brinda los cuidados respectivos, la duración del poliuretano será indefinida.
- Cuenta con una excelente adherencia a los materiales de construcción.

- Refuerza y protege a la superficie aislada
- Alta resistencia al ataque de ácidos, álcalis, agua dulce, hidrocarburos, etc.

2.2.2. Propiedades mecánicas. Dependerá de su peso volumétrico; a medida que esta incrementa, incrementa su resistencia. Los pesos volumétricos más comunes están entre los 30 y 100 kg/m³. Para estos intervalos se obtienen los valores:

- Resistencia a la tracción entre 3 y 10 (kp./cm²)
- Resistencia a la compresión entre 1, 5 y 9 (kp./cm²)
- Resistencia al cizallamiento entre 1 y 5 (kp./cm²)
- Módulo de elasticidad entre 40 y 200 (kp./cm²)

2.2.3. Resistencia a los productos químicos. El poliuretano es resistente al agua potable, agua de lluvia y agua de mar, soluciones alcalinas diluidas, ácidos diluidos, hidrocarburos, el propano, aceite mineral y aire industrial (SO₂). No es resistente a los ácidos concentrados.

2.2.4. Aplicaciones. Su principal uso es para ofrecer un excelente aislamiento térmico y una perfecta impermeabilización. La espuma rígida de poliuretano contribuye en gran medida a la sostenibilidad de las congeladoras gracias a que reduce la cantidad de energía necesaria para mantener el frío. Las espumas de poliuretano sirven para generar comodidad en la elaboración de muebles, debido a su flexibilidad, durabilidad, ofrecen un apoyo adecuado y conservan su forma original. Son un material de relleno de cojines y colchones convenientes y seguros y se pueden manufacturar en distintas densidades.



Figura 2.7. Ventajas del aislamiento térmico del poliuretano.

Fuente: Soluciones con Aislamiento de Poliuretano
Fuente: ANDIMA

Los poliuretanos se utilizan en grandes cantidades en la fabricación de automóviles ya que esto te ofrece ventajas en lo relacionado a la comodidad, protección y conservación de energía. Estas espumas se emplean en los asientos, reposabrazos y reposacabezas. Gracias a su resistencia y ligereza reducen el peso de los vehículos y permite una mayor eficiencia en el consumo de combustibles.

Los poliuretanos más ligeros y de gran resistencia a la abrasión son fundamentales para la fabricación de suelas de calzado resistentes y que a su vez ofrecen propiedades mecánicas excelentes a largo plazo.

Los poliuretanos están presentes en todos los ámbitos de la vida diaria; su versatilidad y la sostenibilidad que permite contribuir al ahorro energético son puntos clave que llaman la atención a la industria de hoy en día.

2.3.Concreto Ligero.

2.3.1.Definición. El concreto ligero, como la mayoría de los concretos, es un material inorgánico compuesto de agregados, mortero y agua. La diferencia de este tipo de concreto es que es de peso reducido y comúnmente de baja resistencia; sin embargo, tiene una amplia aplicación en muchos tipos de estructuras, como casas, departamentos, escuelas, etc., en virtud de los beneficios que son fáciles de obtener con sus aplicaciones. Con el desarrollo de la industria de la construcción, se optó por incrementar el campo de materiales de construcción y a su vez incrementar su eficiencia de trabajo.

De esta forma, materiales de desechos industriales, escorias de altos hornos, cenizas volcánicas, perlita, pómez, etc., adquirieron importancia con el desarrollo del concreto ligero. Los mayores beneficios que brindan los concretos ligeros son su alto poder de aislamiento térmico y acústico, su facilidad de manejar debido a su peso reducido, entre otras ventajas se debe considerar la reducción de costos con concretos ordinarios. Para López, (2015, p.34), define a la porosidad como “un factor que define las características térmicas, la absorción y el contenido de humedad de los concretos ligeros. Los concretos con porosidades pequeñas son preferibles en virtud de que así se logra mayor resistencia y aislamiento térmico.”

2.3.2. Ventajas y desventajas. El concreto ligero cuenta con algunas ventajas como:

- Reducción del peso de la estructura.
- Mejora el aislamiento térmico y acústico de una estructura.
- Reduce la transmisión de vibraciones.
- Reduce los costos de producción.

Asimismo, cuenta con ciertas desventajas como:

- Se pueden producir grandes deformaciones debido a su bajo módulo de elasticidad.
- Debe tenerse en consideración en el dimensionamiento de los elementos constructivos la contracción por secado.
- Algunos agregados livianos pueden llegar a ser más caros que los comunes.

2.3.3. Clases de Concreto Ligero. La clasificación común del concreto ligero se basa en función de sus propiedades sobresalientes, de sus pesos volumétricos, de los materiales que lo integran o de los métodos empleados en su elaboración.

- Concreto ligero aislante de baja resistencia: 280 a 800 kg/m³.
- Concreto ligero moderada resistencia: 800 a 1400 kg/m³.
- Concreto ligero estructural de baja densidad: 1400 a 2100 kg/m³.

En la siguiente grafica se muestra, en base de esta clasificación, en base a su grado de resistencia y peso volumétrico.

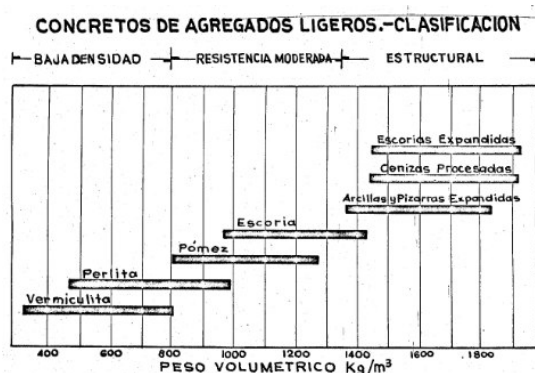


Figura 2.9. Clasificación del concreto ligero.

Fuente: Estudios sobre concretos ligeros. Revista INCYC

2.3.3.1. Concreto Ligero aislante de baja resistencia. Es un concreto aislante de baja resistencia. Los materiales que lo conforman pueden ser los mismos que contiene un concreto convencional, pero los agregados pueden llegar a reducir sus cantidades.

2.3.3.2. Concreto ligero aislante de moderada resistencia. Es un concreto liviano que tiene una resistencia a compresión desde los 7 a 17 MPa. Los elementos hechos con este tipo de concreto ligero tendrán un gran desempeño con respecto al consumo de energía destinada para calefacción y aire acondicionado a futuro, lo que conllevará a menores costos.

2.3.3.3. Concreto liviano estructural de baja densidad. Es un concreto liviano que tiene una densidad menor. Se produce con agregados livianos o con una combinación entre los convencionales y estos. Este tipo de concreto tiende a reducir las cargas muertas de los mismos miembros del concreto.

Tabla 2.6. Densidad y resistencia del concreto ligero.

Concreto ligero	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a Compresión (Mpa)
Aislante de baja resistencia	280 a 800	>17
Aislante de Moderada resistencia	800 a 1400	0.7 a 7
Estructural de baja densidad	1400 a 2100	7 a 17

Fuente: Elaboración propia

2.3.4. Morteros ligeros con materiales tradicionales.

2.3.4.1. Arcilla *expandida*. Este agregado se obtiene sometiendo a la arcilla a un proceso de cocción a altas temperaturas (1200°C), creando pequeñas burbujas de aire en su composición. Para Ozguven, (2012, p.781-787), “esta propiedad confiere un gran poder aislante, por lo que es un material idóneo para su aplicación en aislamientos, conglomerados ligeros y prefabricados de uso en edificación.”

La arcilla expandida ha sido empleada en hormigones y en morteros aligerados, ya que reduce considerablemente su peso y obtiene una menor conductividad térmica.

2.3.4.2. Perlita *expandida*. Es un mineral de origen volcánico formado en su mayoría por silicatos, se tritura y se calienta a temperaturas entre 900-1200°C. Lanzón M, García-Ruiz P.A, comentan que “el proceso que el agua ocluida se evapora haciendo que el silicato se expanda hasta 20 veces su volumen inicial. Esta transformación proporciona características muy beneficiosas para su uso como agregado ligero en hormigones, morteros, mejorando su aislamiento térmico y acústico.”

2.3.4.3. Vermiculita *expandida*. Es un mineral compuesto por silicatos hidratados de aluminio y magnesio. Al igual que la perlita expandida, mediante el proceso de calentamiento del mineral en un horno hasta unos 800°C se empezará a laminar y se expandirá entre 20 y 30 veces su volumen.

Las láminas formadas servirán como micro espejos que reflejan tanto las ondas térmicas como las sonoras.

2.3.5. Morteros ligeros con residuos industriales.

2.3.5.1. Corcho natural. Es un material ligero celular que constituye la corteza del alcornoque.

Las ventajas del corcho están basadas en su densidad y su estructura celular brindándole una baja conductividad térmica, buen aislamiento acústico y alta impermeabilidad. Su aplicación en compuestos a base de cemento está basada en trabajos realizados por Panesar D.K y Shindman B. donde se examina el impacto del uso del corcho como remplazo de la arena o piedra.

2.3.5.2. Papel reciclado. Los éteres de celulosa provenientes del papel se usan comúnmente para mejorar las propiedades del mortero en estado fresco al retener agua, capacidad de trabajo y tiempo abierto. En base a estos antecedentes, se han incluidos estos desechos obteniendo materiales ligeros, homogéneos y con mejor estabilidad térmica y mecánica.

2.3.6. Morteros modificados con polímeros. La modificación de conglomerados con polímeros para obtener materiales con propiedades mejoradas no es novedosa, ya que la investigación y desarrollo de estos se ha realizado desde los últimos 70 años. Producto de ello se han desarrollado diversos compuestos aligerados que son famosos hoy en día por su buena relación costo-rendimiento.

Los morteros de cemento a base de polímeros se denominan PCM (polymer cement mortar), que incluyen emulsiones (látex), resinas líquidas, polvos de polímero redispersable, en la sustitución parcial de los ligantes hidratos del cemento por polímeros diversos.

2.3.7. Morteros aligerados con residuos poliméricos. Son producidos mediante la sustitución de áridos ligeros por agregados poliméricos ligeros, ya sea parcial o totalmente, con el propósito de reducir la eliminación de residuos sólidos, contaminación del ambiente y el consumo de energía.

2.3.7.1. Poliestireno expandido (EPS). Es un polímero termoplástico con una estructura celular rígida y cerrada. Actualmente es el polímero más conocido internacionalmente. Los trabajos realizados mediante la adición de residuos de EPS como agregado ligero datan de los últimos 15 años.

2.3.7.2. Politereftalato de etilo (PET). Es un polímero termoplástico lineal con un alto grado de cristalización que puede ser procesado mediante extrusión, inyección y soplado de preforma y termoconformado. Fue creado por primera vez en 1941 por los científicos Whinfield y Dickson, quienes lo patentaron como polímero para fabricación de fibras. Rebeiz K. fue el primer investigador en emplear PET como sustituto árido. Los resultados obtenidos dan una disminución de la densidad, aumento de la conductividad térmica y reducción de la resistencia mecánica de flexión.

2.3.7.3. Polietilvinilacetato de etilo (copolímero EVA). Los estudios de este agregado en materiales de construcción son muy recientes, ya que brinda mejoras en el hormigón bituminoso. En base a los estudios de Tutikian B. donde analiza el aislamiento acústico en el hormigón ligero con residuos de EVA en suelos, confirma que este agregado reduce los niveles de ruido de impacto mejorando su impermeabilidad.

2.3.8. Morteros aligerados con merma de poliuretano. El poliuretano es un polímero termoestable resultado de una polimerización de monómeros tipo poliisocionato y polihidroxílicos. Su origen se remonta con el químico Otto Bayer, director de Bayer en los años 30, intentaba descubrir una fibra sintética parecida a la poliamida (Nailon). Los poliuretanos nacieron cuando Bayer trabajaba con un grupo de reactivos que formaba uretanos al entrar al contacto con los alcoholes. Otto Bayer y sus colaboradores publicaron su patente en 1937 y su producción industrial comenzó en 1940. Pero debido a la falta de presupuesto por la Segunda Guerra Mundial, la producción creció lentamente.

El empleo que se le dio al Poliuretano en esta época fue la de un sustituto del caucho, caro y difícil de obtener en esta época. Durante la guerra se dio otras aplicaciones al Poliuretano como acabados de aviones hasta ropas resistentes.

En los años 50 los poliuretanos se empleaban para la elaboración de adhesivos, elastómeros y espumas rígidas y, al final de la década, en espumas de acolchado flexible similares a las contemporáneas.

Con el tiempo se obtuvieron muchos más avances y actualmente se pueden encontrar diversas aplicaciones del poliuretano en todos los aspectos de la vida cotidiana. El poliuretano es un producto poco conocido ya que la mayoría los encuentra oculta tras cubiertas y superficies compuestas por otros materiales, pero sin lugar a duda es difícil imaginar nuestra sociedad sin él.

La cantidad de aplicaciones que tiene es larga y no deja de ampliarse, ya que es un material muy versátil al que se le puede encontrar infinidad de usos. El poliuretano cuenta con las siguientes propiedades:

- Alta resistencia al desgaste y a la abrasión.
- Alta elasticidad incluso en las durezas más altas.
- Gran resistencia al desgarre y cizallamiento.
- Excelente Comportamiento tracción/compression.
- Resistencia al agua, gasolinas, aceites, etc.



Figura 2.10. Espuma de poliuretano empleado en la construcción.

Fuente: Espuma de poliuretano proyectado. Copyright por Manuel Perez.

2.3.8.1. Conductividad y resistencia térmica del poliuretano.

2.3.8.1.1. Conductividad térmica. La alta capacidad aislante del poliuretano no se compara con ningún material de construcción empleado comúnmente. Esta característica especial es gracias a la baja conductividad térmica. El poliuretano proyectado no supera el valor de conductividad térmica inicial debido a que las celdas no impiden totalmente la difusión de gases a través de sus paredes.

Tabla 2.7. Coeficiente de conductividad térmica del poliuretano

Conductividad térmica del poliuretano
$k = 0.028 \text{ W/m.K}$

Fuente: Elaboración Propia

2.3.8.1.2. *Resistencia térmica.* En base del valor del coeficiente de conductividad térmica, y conociendo el espesor aplicado, se puede conocer la resistencia térmica mediante la ecuación 2.1.

$$R = \frac{e}{k} \dots \dots \dots (2.1)$$

Donde:

R es la resistencia térmica, en $\text{m}^2.\text{K/W}$

e es el espesor, en m

k es la conductividad térmica, en W/m.K

2.3.8.1.3. Aplicaciones. El poliuretano se emplea para crear varios productos industriales y de consumo que son importantes para poder hacer la vida de las personas más prácticas. El material es ampliamente usado en la cadena fría de alimentos, en tapizados y colchones, zapatos, dispositivos médicos, autos y el aislamiento térmico de edificios y equipos técnicos. En todas sus aplicaciones, el poliuretano reduce el uso de recursos obteniendo soluciones durables y de peso ligero. En el sector de construcción, cuando el poliuretano se usa como recubrimiento se asegura la longevidad de los elementos estructurales.

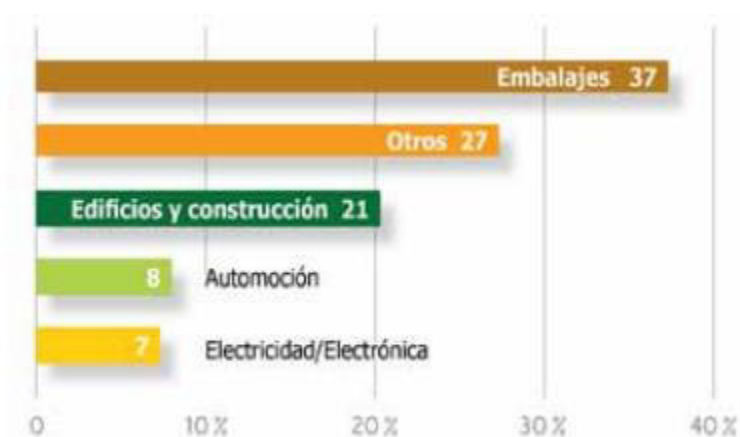


Figura 2.11. Cuadro porcentual de las aplicaciones del poliuretano.

Fuente: Aislamiento de poliuretano y gestión de residuos en el contexto de la eficiencia de recursos.
Copyright 2013 por PU Europe.

2.4.La conductividad térmica

2.4.1. Definición. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a una cuyas partículas son menos energéticas, debido a una interacción entre estas. En los líquidos y gases la conducción se da por las colisiones y difusiones de las moléculas; mientras que en el caso de los sólidos se da por las vibraciones de las moléculas y la energía es transportada por los electrones libres.

Para Cengel, (2007, p.18), “La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.”

Figura N°12

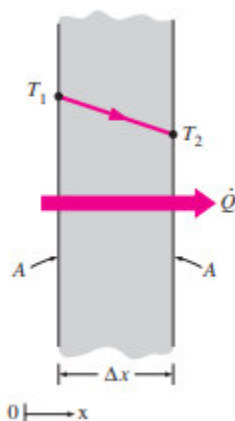


Figura 2.12. Conducción de calor a través de una pared plana grande

Fuente: Transferencia de calor y masa. Copyright 2007 por Cengel.

Por consiguiente, se concluye que la razón de la transferencia de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura y al área de transferencia de calor, pero inversamente proporcional a su espesor. Tal y como la podemos observar en la ecuación 2.2.

$$\text{Razón de conducción del calor} \propto \frac{(\text{Area})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$

$$\dot{Q} = kA \left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \right) = -kA \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \dots \dots \dots 2.2$$

En donde se puede observar k que es la conductividad térmica del material, que es la medida de capacidad de calor de un material. En el caso que el límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación anterior se reduce a la forma diferencial. Ver ecuación 2.3.

$$\dot{Q} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \dots \dots \dots 2.3$$

Esta recibe el nombre de ley de Fourier de la conducción de calor, quien lo expreso por primera vez en su texto de transferencia de calor en el año 1822. El calor se conduce en dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de la temperatura se vuelve negativo.

Se ha visto que los diferentes materiales almacenan calor en diferente forma y por tal motivo se ha definido la propiedad de calor específico como una medida única para cada tipo de material.

Tabla 2.8. Coeficiente de conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	k , W/m · °C*
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Fuente: Transferencia de calor y masa, 2009.

La conductividad térmica tiene una capacidad elevada en los metales y en general en cuerpos continuos, y mucha más baja en los gases, tal es el caso de algunos materiales especiales como la fibra de vidrio cuya conductividad térmica es baja y por el mismo motivo recibe la denominación de aislante térmico. Para que se genere la conducción térmica es necesario una sustancia, por tal motivo no existe conducción térmica en el vacío. En mayor o menor medida, todos los materiales oponen resistencia al paso del calor. Los metales tienen una baja resistencia, por eso son buenos conductores térmicos.

Por otro lado, los materiales de construcción (yesos, cemento, etc.) cuentan con una resistencia media. De aquí parte una de las razones que en la presente tesis trata de analizar la conductividad térmica de un novedoso concreto aligerado con merma de poliuretano y se pueda demostrar que tiene una mayor resistencia térmica que el concreto convencional.

Los materiales que ofrecen una alta resistencia térmica se llaman aislantes térmicos. Por tal motivo el comportamiento de los cerramientos y de los componentes de construcción, juegan un doble papel desde un punto de vista térmico: el papel resistente y capacitivo o inercial. El resistivo depende directamente del espesor del material e inversamente de su conductividad térmica; el capacitivo es directamente proporcional al calor específico, al espesor y a la densidad.

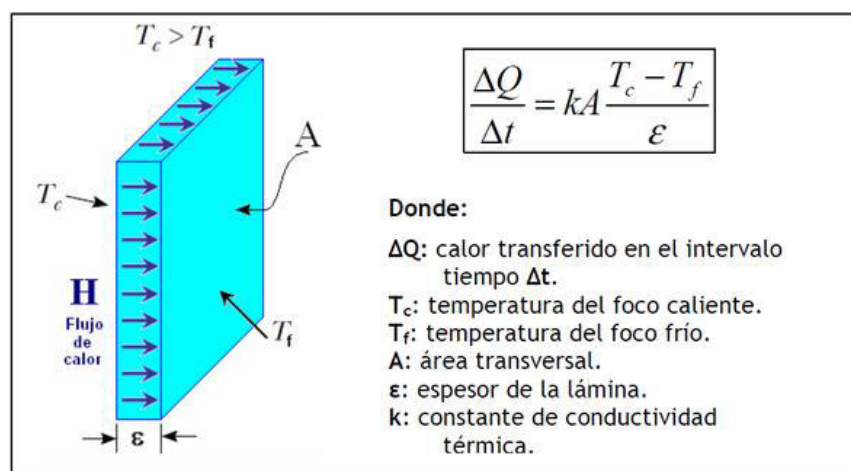


Figura 2.13. Esquema representativo del flujo de calor a través de una superficie

Fuente: Conductividad Térmica (Fis 152). Copyright 2014.

2.4.2. Conductividad térmica para gases poliatómicos. Mediante la ecuación de Eucken, k es la conductividad térmica de la sustancia, μ es el coeficiente de viscosidad, M es el peso molecular de la sustancia, C_p es la capacidad calórica a presión constante, y R es la constante de los gases ideales. Ver ecuación 2.4.

$$k = \mu \cdot \left(C_p + \frac{1.25 \cdot R}{M} \right) \dots \dots \dots 2.4$$

2.4.3. Para una mezcla de gases. Mediante la ecuación de Wilke, k_{Mezcla} es la conductividad calorífica de la mezcla de gases, $x_{i,j}$ son las fracciones molares de las sustancias, Φ_{ij} es un adimensional, $M_{i,j}$ son los pesos moleculares de las sustancias, y $k_{i,j}$ son las conductividades caloríficas de las sustancias. Ver ecuación 2.5.

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 - \frac{M_i}{M_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2$$

$$k_{mezcla} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \cdot k_i}{\sum_{j=1}^n x_j \cdot \Phi_{ij}} \dots \dots \dots 2.5$$

2.4.4. Conductividad térmica en sólidos. La conducción de electrones mediante un gas de electrones sigue los principios de la mecánica cuántica. Donde $C_{v,el}$ es la contribución electrónica a la capacidad calórica volumétrica de un metal, n_e es número de electrones por cm^3 , ϵ_F es la energía de Fermi, k_{el} es la conductividad térmica. Ver ecuación 2.6.

$$c_{v,el} = \frac{\pi^2 \cdot n_e \cdot k_b^2 T}{2\epsilon_F}; \bar{V}_F = \frac{2\epsilon_F}{m_e}; k = \frac{c_v \bar{V} \lambda}{3}$$

$$k_{el} = \frac{\pi^2 \cdot n_e \cdot k_b^2 T \lambda_{el}}{3m_e \bar{V}_F} \dots \dots \dots 2.6$$

2.4.5. Conductividad térmica en líquidos. Para los casos de líquidos se trabaja con la ecuación de Brigman-Bird. Donde, V_s es la velocidad del sonido en el líquido y β es la compresibilidad. Ver ecuación 2.7.

$$V_s = \left[\frac{c_p}{c_v} \left(\frac{1}{\rho \beta} \right)_T \right]^{1/2}$$

$$k = 2.8 k_{B \cdot V} S \left(\frac{N_0}{\bar{V}} \right)^{\frac{2}{3}} \dots \dots \dots 2.7$$

2.4.6. Conducción. La conducción térmica de los materiales depende de su propiedades internas o atómicas. El modelo que describe la transferencia de calor es la ley de Fourier:

$$q_n = -k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)$$

Donde n es la dirección del flujo. Esta ley responde a la primera ley de la termodinámica, debido que el calor se transfiere del foco caliente al foco frío. Por otro lado, se conoce en la ecuación 2.8.

$$q = \rho C_p \Delta T$$

Definiendo el coeficiente de difusividad térmica

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Donde se resuelve:

$$q = \frac{\alpha(\rho C_p(T - T_{ref}))}{\partial \eta} \dots\dots\dots 2.8$$

2.4.7. Simplificación de la conducción (Método de las resistencias). Bajo la ley de Fourier

para n cuerpos en contacto desde un punto a una temperatura T_0 a otro con una temperatura T_n . Se puede ver en la ecuación 2.9.

$$q \left[\frac{\omega}{m^2} \right] = \frac{(T_n - T_0)}{\sum_{i=1}^n R_i} \dots\dots\dots 2.9$$

Donde $\sum_{i=1}^n R_i$, representa la suma de todas las resistencias en base de su geometría:

- Rectangular:

$$R_i = \frac{\Delta x_i}{k_i}$$

- Cilíndrica:

$$R_i = \frac{\ln(r_{i+1} / r_i)}{K_i}$$

Recordar: Que la expresión para la resistencia R_i puede cambiar no solo según su geometría sino también por su tipo de transferencia de calor.

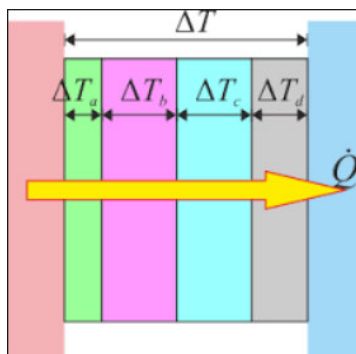


Figura 2.14. Resistencias en serie.

Fuente: Calor y calorimetría. Copyright 2018 del Departamento de Física Aplicada III, Universidad de Sevilla.

2.4.8. Conductividad térmica en elementos de construcción. El conocer las propiedades físicas y mecánicas de un material permiten su empleo en aplicaciones industriales o de construcción según sus necesidades. Para P. Lertwattanakul y J. Choksiriwanna, (2011, pp.53-61), “Si nos enfocamos en las propiedades físicas, dentro de ellas está la conductividad térmica (k); dicho parámetro depende de su estructura interna, humedad, configuración geométrica, composición química del material y su temperatura.” En caso de materiales compuestos, la conductividad térmica dependerá de cada fase que lo conforme. Actualmente se aplica diferentes técnicas experimentales para obtener el coeficiente de conductividad térmica (k), una es la de placa caliente con guardas y la otra es la cámara de aislamiento térmico. En la presente tesis, se empleará el método de la placa caliente para obtener el coeficiente de conductividad térmica.

2.4.8.1. Método de la placa caliente. El método consiste en colocar la muestra entre 2 placas, una caliente (T_1) y otra fría(T_2); a causa del gradiente de temperatura, se da la transferencia de calor a través de la muestra. Esta cuantificación de energía térmica se da a través del espesor de la muestra (Δx), área transversal (A) y la gradiente de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$). P representa la potencia eléctrica que es suministrada a las resistencias en la placa caliente, la cual se transforma en calor por efecto de Joule. Estas se rigen bajo la siguiente expresión. Ver ecuación 2.10.

$$k_e = \frac{P \Delta x}{A \Delta T} \dots \dots \dots 2.10$$

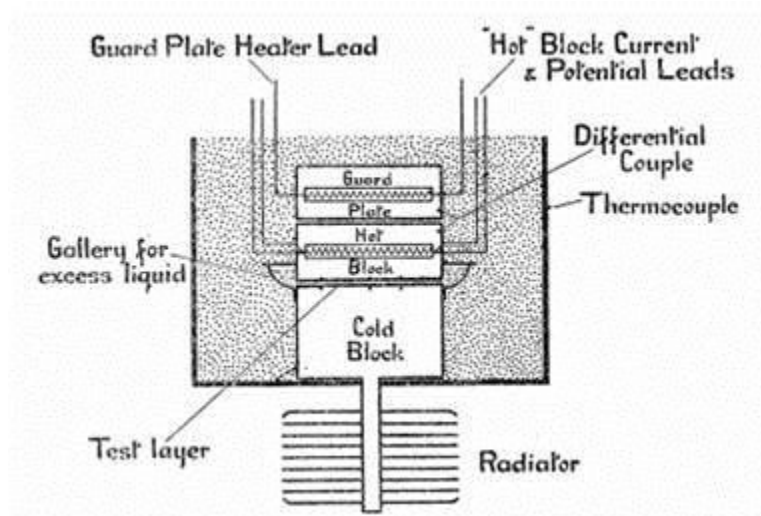


Figura 2.15. Equipo con placa caliente para obtener coeficiente de conductividad térmica

Fuente: Desarrollo de un método para evaluar la conductividad en aceites vegetales y biodiesel. Copyright 2014 Santiago Maldonado.

2.4.8.2. Método de la cámara de aislamiento térmico. Esta cámara está constituida por una cámara caliente, la muestra, placa caliente, cámara fría, placa fría, sensores PT-100, controladores de sensores, medidor de potencia eléctrica, una base de madera, riel metálico y una computadora que registrara la gradiente de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$) en función del tiempo.



Figura 2.16. Cámara de aislamiento térmico.

Fuente: Determinación Experimental. Copyright 2014 por G. Peña.

2.5. Medición de la conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor, al imponerle una gradiente de temperatura. Uno de los métodos para poder medir la conductividad térmica es el uso de un Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG).

Los valores experimentales obtenidos se emplean en el diseño y simulación de cargas térmicas en edificios, operación de plantas y sistemas que utilizan energía, con el único propósito de optimizar o mejorar el diseño de diversos elementos en las plantas de procesos, particularmente en equipos que transfieran calor por conducción.

El cálculo de las cargas térmicas para modelar un comportamiento térmico puede mejorar si se cuenta con las siguientes propiedades termofísicas: densidad, viscosidad, capacidad calorífica y conductividad térmica. En la presente tesis se presentarán los resultados de la medición de conductividad térmica de un concreto ligero hecho con merma de placas de poliuretano empleando el APCG.

El principio de operación de un APCG se basa sobre la técnica de transferencia de calor por conducción en estado permanente entre dos placas frías y una placa caliente central que tiene una guarda.

2.5.1. Aparato de placa caliente con guarda.

2.5.1.1. Principio de operación. Es un aparato que permite la transferencia de calor por conducción en estado permanente y que permite determinar la conductividad térmica a través de la siguiente de la ecuación 2.11.

$$k = q \cdot x / (A\Delta T) \dots\dots\dots 2.11$$

Donde q es la rapidez del flujo de calor a través de la muestra en W, k es la conductividad térmica de la muestra W/m K, ΔT es la diferencia de temperatura entre la muestra K o °C, x es el espesor de la muestra en m y A es el área de la sección transversal en m². Si la muestra de estudio es un compuesto laminar o muestra porosidades en las que el calor se puede transmitir por convección o radiación, la conductividad térmica de la muestra será parecida a la real.

2.5.1.2. Instrumento. El APCG sirva para medir la resistencia y la conductividad térmica aparente de materiales aislantes. Todo esto se basa en el caso ideal que el flujo de calor es unidimensional a través, de la muestra, desde el plato caliente hacia el plato frío en la dirección z . Según Lira L, (1997, pp 101-105), “el cálculo de la conductividad térmica aparente y la resistencia térmica aparente, se obtiene a partir del calor que se genera en el área de medición, las temperaturas de los platos calientes y frío, el espesor de la muestra y el área.”

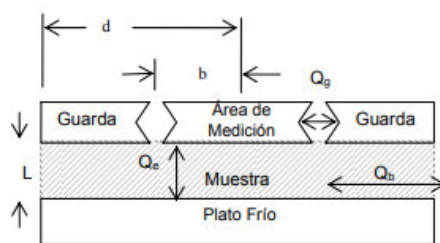


Figura 2.17. Componentes principales para medir la conductividad térmica.

Fuente: Medición de la conductividad térmica de algunos materiales usados en edificaciones. Copyright 2008 por Lira L.

2.5.1.3. Estado permanente térmico. Es el estado regulado de la muestra en el aparato con el fin de alcanzar las condiciones de temperatura con las que se realizaran las pruebas.

Hay que recordar que el tiempo incrementa si la muestra tiene un espesor más grande.

2.5.1.4. Adquisición de datos. Los datos que se necesita recolectar son la potencia eléctrica, la temperatura superficial, el área de medición y el espesor de la muestra. El flujo de calor se obtiene mediante la medición de la corriente eléctrica que circula en las resistencias de la placa caliente y la caída de tensión, mediante la siguiente relación. Ver ecuación 2.12.

$$Q=V.I \dots \dots \dots 2.12$$

Los datos de diferencia de temperatura y temperatura de la placa caliente se grafica en función del tiempo para poder saber si la muestra alcanzo el estado permanente.

2.5.1.5. Análisis de resultados. Con los valores obtenidos del uso de APCG, se obtienen los datos necesarios para poder obtener: el flujo de calor, la temperatura de la placa fría, temperatura de la placa caliente, la temperatura media o de la muestra, la gradiente de temperatura, el espesor de la muestra, la conductividad y resistencia térmica.

3. CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TEMA

3.1. Condiciones iniciales

- a) Para poder obtener el coeficiente de conductividad térmica, que es la variable fundamental para nuestro análisis, es necesario realizar muestras de concreto ligero con merma de placas de poliuretano.
- b) Basándonos en el artículo de investigación “Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam de V. Calderón, publicado en la editorial ELSEVIER en agosto 2012, usaremos la dosificación 3PU25 que consiste en emplear el cemento y el agregado en una relación de 1 a 3 con respecto al peso.
- c) A pesar que la dosificación inicial se consideró en peso, el 25 % de cantidad de arena se sustituyera por una cuantificación equivalente de poliuretano en volumen.
- d) La cantidad de agua agregada será la necesaria para asegurar una buena trabajabilidad, fluidez y plasticidad, de acuerdo a la norma técnica peruana NTP 339.088.
- e) En un molde de 20x20x0.8 cm (Largo x Ancho x Alto) de medidas interiores vaciar la mezcla para así obtener las muestras de estudio. Recordar que después de colocar la mezcla en el molde es necesario dejarlo secar 7 días al aire para poder proceder al análisis térmico en el laboratorio.
- f) Para hallar el coeficiente de conductividad térmica se empleará un método que establece criterios para medidas de flujos calor en estado estacionario en muestras planas homogéneas, cuyas superficies están en contacto con fronteras que mantienen la temperatura constante usando el aparato de plato caliente de guarda.

g) Se pondrá en práctica las normas internacionales para medición del flujo de calor unidimensional en estado permanente (ASTM C-177 - 19):

- i) La sección medida y la protección primaria deben aislarse térmicamente entre sí por medio de un espacio físico o un hueco situado entre las 2 secciones.
- ii) La diferencia de temperatura media entre la placa de superficie de sección media y la superficie de guardia de primaria no debe exceder en 0.2 °C.
- iii) Para una aceptable precisión de medición se necesita de una geometría de muestra proporción grande de área respecto al espesor.
- iv) Para reducir la diferencia de temperatura lateral entre el medidor y la superficie de guardia primaria, fabricar estas placas a partir de materiales que tengan alto conductividad térmica.
- v) El tamaño de la sección medida tiene que ser lo suficientemente grande para que la muestra en contacto con la sección medida, pueda considerarse representativa del material que se está probando.

3.2.Datos iniciales

Datos Técnicos para la dosificación de la mezcla:

- a) Densidad de arena gruesa: 1450 kg/m^3 .
- b) Densidad de las placas de poliuretano: 32 kg/m^3 .

Dimensiones de la muestra:

- a) Área de la muestra: $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} = 0.04 \text{ m}^2$.
- b) Espesor de la muestra: 0.008 m .

3.3.Metodología del calculo

3.3.1.Dosificación de la mezcla. Tomando en cuenta las condiciones iniciales se usará las siguientes cantidades en una relación 1:3. Recordar que la dosificación debe permitir la facilidad de trabajo con el concreto y que sea de consistencia homogénea. Presentamos en la tabla 3.1 la dosificación utilizada para obtener las muestras a analizar.

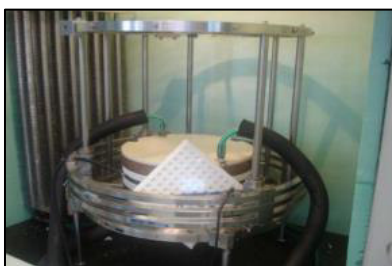


Figura 3.1. Equipo para medir la conductividad térmica de materiales solidos aislantes. (APCG).

Fuente: Medición de la conductividad térmica de algunos materiales usados en edificaciones. Copyright 2008 por Lira L.

3.3.2. Revisión del equipo.

- a) Limpiar la base y la cubierta de las placas con un solvente orgánico como se puede ver en la Fig. 3.1.
- b) Se verifica que la placa de medición este correctamente acoplada al interior del anillo de la guarda, igualmente espaciadas.
- c) Se inspecciona las cintas calentadoras que estén perfectamente recubiertas con mica aislante.
- d) Verificar que los cables estén aislados e instalados correctamente.
- e) Verificar que los sensores RTD (Detector de temperatura resistivo)
- f) Inspeccionar el roscado y engrasar si se necesita.

3.3.3. Preparación de la muestra.

- a) Se seleccionan dos muestras que sean del mismo material.
- b) Se verifica que las muestras sean iguales en dimensiones, figura y superficies.
- c) Se debe trabajar sobre las muestras para que las superficies sean planas.
- d) Se inspeccionan que las superficies de las muestras estén libres de polvo o alguna impureza que afecte el contacto entre las muestras y las placas y en consecuencia afecte la medición de la conductividad térmica.

3.3.4. Realización del ensayo.

- a) Después de que todo el equipo de medición se encuentre acoplado, interconectado y funcionando cada una de sus partes se realizara la medición para determinar la conductividad térmica aparente.
- b) Se verifica que los sensores que registran las temperaturas de las placas, de la cámara y la temperatura ambiente estén monitoreando correctamente.

- c) El intervalo para la toma de datos es cada 5 minutos hasta que alcance el estado estable para luego reducir el intervalo a 1 minuto. En el estado estable, se recomienda inspeccionar por un periodo de 40 minutos como mínimo.
- d) Se efectúan las operaciones correspondientes con los datos de la temperatura registrados, los datos físicos de las muestras (espesor y área de la superficie) y la potencia proporcionada por el voltaje y corriente directa de la fuente de poder a la cual esté operando de la placa de medición.
- e) Finalmente se vacía todos los datos en un formato especial que recopila toda la información correspondiente, donde uno de los datos importantes es el valor del coeficiente de conductividad térmica.

Descripción del equipo experimental

El equipo fue diseñado basado en las normas ASTM C518 y C177 y consta de las siguientes partes:

- a) Una placa central con guarda primaria, placas auxiliares dotadas de un sistema de control capaz de mantener iguales las temperaturas de ambas en todo el intervalo de trabajo 23°C - 80°C.
- b) Placas de testeo cuyas dimensiones son: 300 mm de ancho x 300 mm de largo x 50 mm de alto.
- c) Dos placas auxiliares de calentamiento (resistencias auxiliares) con sistema de regulación de potencia.
- d) Placas de aislante externo.
- e) Dos enfriadores con agua para retirar el calor generado en las resistencias.
- f) Una manta aislante lateral envolvente

- g) 17 termocuplas, 2 tipo K y 15 tipo J, ubicadas en las superficies de las placas calentadoras. Las termocuplas tipo J son empleadas principalmente en la industria del plástico, goma y fundición de metales a bajas temperaturas, mientras que las termocuplas tipo K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300°C.
- h) Un panel de control para el monitoreo de las temperaturas, los voltajes y las corrientes eléctricas de las resistencias y desde donde controlan las temperaturas de la placa central y la guarda primaria.

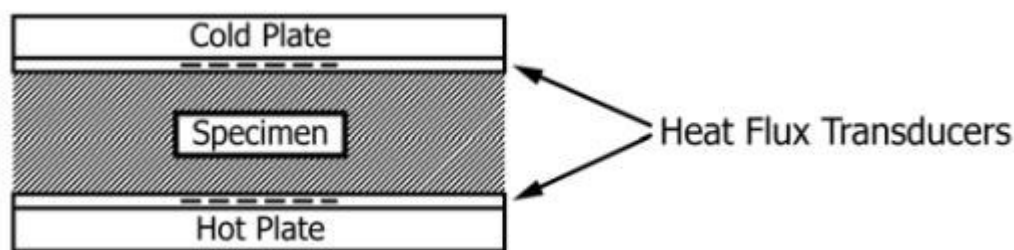


Figura 3.2. Esquema de un equipo para obtener la conductividad térmica de materiales sólidos (APCG).

Fuente: Medición de la conductividad térmica de algunos materiales usados en edificaciones. Copyright 2008 por Lira L.

Parámetros Técnicos

- Exactitud de la temperatura de control: 0.05 °C.
- Resolución: 0.01 °C.
- Máximo ajuste de temperatura de la placa caliente: 80°C.
- Mínimo ajuste de temperatura de la placa fría: 0°C.
- Precisión de medición: 3 %
- Rango de medición del coeficiente de conductividad térmica: 0.010 – 5.000 w (k.m)
- Fuente de alimentación: AC 220V.

3.4.Cálculos de ingeniería

Dosificación de la mezcla

1	:	3
200 g. Cemento Portland Tipo I		600 g. Arena Gruesa

Figura 3.3. Relación en peso de los componentes de la mezcla que se empleara en la prueba.

Fuente: Elaboración propia.

El 25 % de cantidad de arena se sustituyera por una cuantificación equivalente de Poliuretano en volumen. Y se usara la ecuación 3.1.

$$d_{arena} = \frac{m_{arena}}{v_{arena}} \dots \dots \dots 3.1$$

$$v_{arena} = \frac{m_{arena}}{d}$$

$$v_{arena} = \frac{m_{arena}}{d_{arena}} = \frac{0.6 \text{ Kg}}{1450 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$v_{arena} = 0.00041379 \text{ m}^3$$

El 25 % del volumen de arena es:

$$25\%v_{arena} = \frac{v_{arena}}{4} = \frac{0.00041379 \text{ m}^3}{4}$$

$$25\%v_{arena} = 0.00010345 \text{ m}^3$$

$$25\%v_{arena} = v_{PU} = 0.00010345 \text{ m}^3$$

Ahora se sustituirán el 25 % de volumen de arena en volumen de merma de placas de poliuretano.

$$m_{PU} = d_{PU} \cdot v_{PU}$$

$$m_{PU} = 32 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0.00010345 \text{ m}^3$$

$$m_{PU} = 0.0033104 \text{ Kg} = 3.3104 \text{ g}$$

Tabla 3.1. Informe de la cantidad en gramos de los elementos emplea en la mezcla.

Elemento	Peso (g)
Cemento	200 g
Arena G.	450 g
Poliestireno	3.3 g

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2. Variación de temperaturas del ensayo

<i>Temperatura en la placa caliente (°Q</i>	<i>Temperatura en la placa fría (°Q</i>	<i>Temperatura promedio (°Q</i>	<i>ΔT (°Q</i>
30.41	13.93	22.17	16.48
34.45	18.92	26.68	15.53
39.50	26.15	32.82	13.35

Fuente: Elaboración Propia

Hallando la Temperatura media o de la prueba

Con el aparato en operación, se alcanza las condiciones de temperatura en las que se realizara la prueba. Se puede tener un panorama más claro de las partes del instrumento en la Fig. 2.14. Se empleará la ecuación 3.3.

$$T_m = (T_c + T_f)/2 \dots \dots \dots 3.3.$$

$$T_m = (30.41 + 13.93)/2$$

$T_m = 22.17^\circ\text{C}$

Tabla 3.3. Informe de medición de la placa de concreto ligero con merma placas de poliuretano

Procedimiento de la Prueba: Aparato de placa caliente con guarda (APCG) con flujo de calor permanente.	
Valores Experimentales	
Nombre de variable:	Valor Promedio:
Potencia Disipada durante la prueba (Q)	29.66 W
Temperatura en la placa caliente (T _h)	30.41 °C
Temperatura en la placa fría (T _c)	13.93 °C
Temperatura media o de la prueba (T _m)	22.17 °C
Temperatura ambiente	23.40 °C
Humedad relativa	65%
Espesor de la muestra	0.008 m
Área de medición	0.04 m ²

Fuente: Elaboración propia

Calculando la conductividad térmica

La tasa de transferencia de calor es dada por la ecuación de Fourier:

$$\frac{dQ}{dt} = KA \frac{dT}{dx}$$

Donde:

dQ es la cantidad de calor transferida

dt el tiempo del ensayo

K	<i>conductividad térmica</i>
A	<i>área de contacto (área de una cara de la muestra)</i>
dx	<i>espesor de la muestra</i>
dT	<i>la diferencia de temperatura (gradiente medido en intervalos de tiempo usando termocuplas del sistema)</i>

En condiciones de temperatura constante $dQ / dt = \text{constante}$, que se puede llamar Q :

$$Q = kA \frac{dT}{dx}$$

Para dT/dx , la tasa de cambio de temperatura por unidad de distancia, es dado por $(T_1 - T_2)/x$ donde x es el espesor de la muestra. Ver ecuación 3.4.

$$Q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{x} \dots \dots \dots 3.4$$

Esto puede considerarse como la ecuación básica para la conducción de calor simple. Se puede usar para calcular la tasa de transferencia de calor a través de una pared uniforme si se conoce la diferencia de temperatura a través de ella y la conductividad térmica del material de la pared.

$$k = \frac{Q \cdot x}{A \cdot (T_1 - T_2)}$$

Se inicio la prueba cuando la muestra tenía la $T_m = 22.17^\circ\text{C}$

$$k = \frac{29.66 \text{ W} \cdot (0.008\text{m})}{0.04\text{m}^2 \cdot (30.41 - 13.93)}$$

$$k = \frac{0.23728 \text{ W} \cdot \text{m}}{0.6592 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$k = 0.36 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Ya conociendo el coeficiente de conductividad térmica, se puede obtener la resistencia térmica del concreto ligero con poliuretano residual.

$$R = \frac{dx}{k.A}$$

$$R = \frac{0.008 \text{ m}}{0.04 \text{ m}^2 \cdot 0.36 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}$$

$$R = 0.55 \frac{^\circ C}{W}$$

Resultados de la prueba de conductividad térmica

En la siguiente Tabla se presenta un resumen de los valores de las conductividades térmicas que se obtuvieron de las pruebas a temperaturas distintas. Las pruebas se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C518-17.

Tabla 3.4. Resultados de la conductividad térmica para la muestra de concreto ligero con merma de placas de Poliuretano.

<i>Muestra</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Temp. Muestra (°C)</i>	ΔT (°C)	k (W/m°C)
<i>Concreto Ligero con Merma de Placas de Poliuretano.</i>	29.66	22.17	16.48	0.36
	32.61	26.68	15.53	0.42
	34.04	32.82	13.35	0.51

Fuente: Elaboración propia

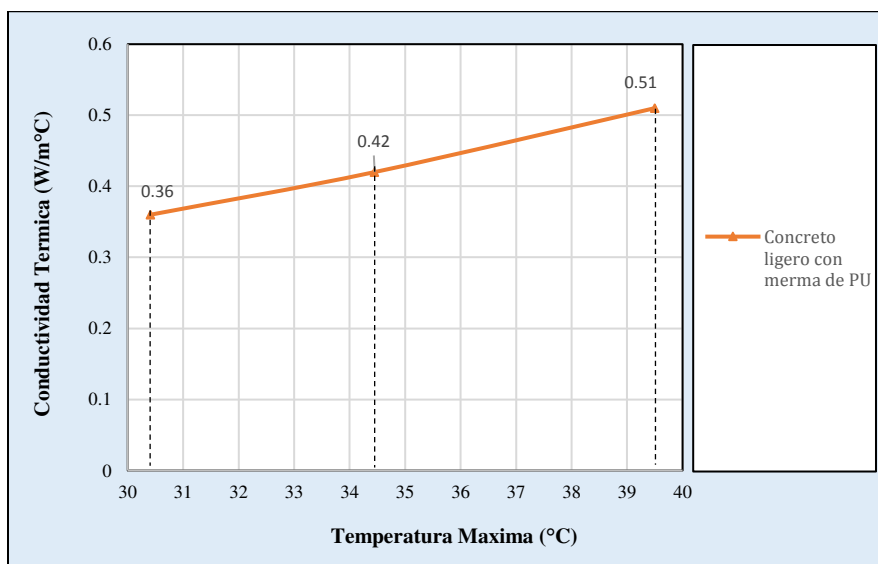


Figura 3.4. Conductividad térmica del concreto ligero con merma de placas de poliuretano en función de su temperatura máxima

Fuente: Elaboración propia

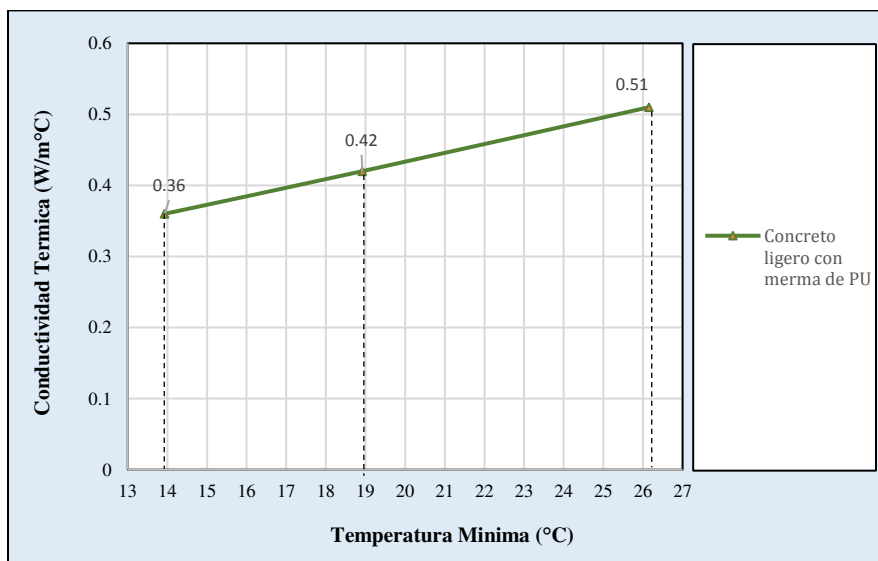


Figura 3.5. Comparación de la conductividad térmica entre el concreto ligero con merma de placas de poliuretano y el concreto simple en función de su temperatura mínima

Fuente: Elaboración propia

Se sabe que la conductividad térmica del concreto ligero con merma de placas de poliuretano es de $0.36 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ a 22.1°C ; mientras que la conductividad térmica del concreto simple es de $1.73 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ a unos 20°C según Teodor Harmsen, uno de los investigadores del concreto más reconocido en el Perú, en su libro de "Diseño de estructuras de concreto armado". Esto nos muestra que el uso de merma de placas de poliuretano agrega e incrementan el valor del aislamiento térmico en el concreto en un 79% aproximado comparado con el concreto simple.

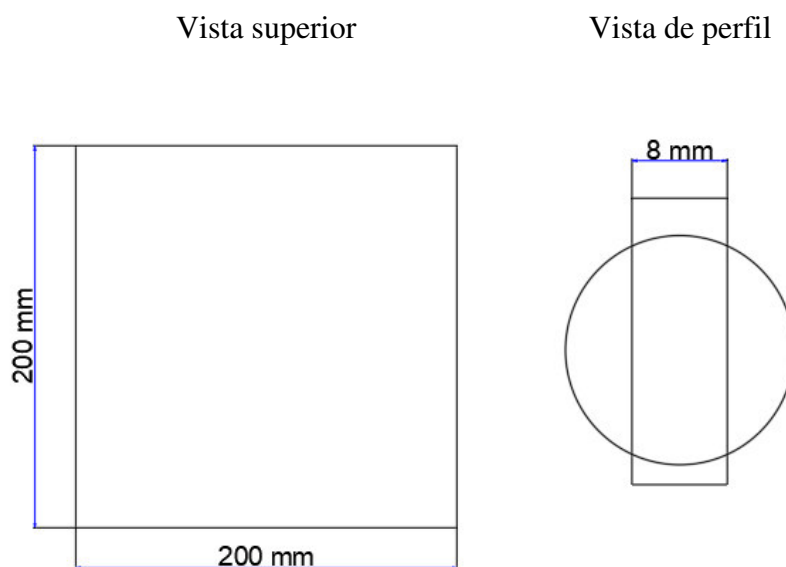
3.5. Análisis de los resultados

Una vez hecho los análisis de resultados correspondiente al ensayo del concreto ligero con merma de placas de poliuretano, se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Según la figuras 3.4 nos muestra que los resultados siguen un comportamiento aproximadamente lineal, que a mayor temperatura, el coeficiente de conductividad térmica es mayor, lo cual es correcto debido a que las vibraciones entre partículas se magnifican a mayor temperatura, y al estar en un estado más excitado permiten el paso de un mayor flujo de calor, amplificando el k de $0.36 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ en una temperatura 30.41°C a un k de $0.51 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ en una temperatura de 39.5°C .
- b) Pasa lo mismo con la temperatura menor, según la figura 3.5 nos muestra que con el paso del tiempo las partículas comienzan a excitarse colisionando entre ellas, en consecuencia, el flujo de calor es más contante y conlleva a que su coeficiente de conductividad térmica incremente.
- c) Se sabe que el coeficiente de conductividad térmica para el concreto simple es $1.73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a 20 grados por lo que hace notorio la diferencia con nuestro concreto ligero con merma de placas de poliuretano, el cual tiene un coeficiente de $0.36 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ para una temperatura de 22.1 grados lo cual indica que el uso de merma de placas de poliuretano agrega e incrementan el valor del aislamiento térmico en el concreto en un 79% aproximado comparado con el concreto simple.

3.6.Metrado

A continuación, se muestra el metrado del concreto ligero, mostrando los valores de incidencia.



HOJA DE METRADOS

PROYECTO: ANALISIS DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD
TERMICA DEL CONCRETO

HOJA
:01

FECHA : 15/06/2018

HECHO POR: BACH. ANGEL EGOAVIL
ROSAS

PARTIDA Nº	ESPECIFICACION	Nº DE VECES	MEDIDAS			PARCIAL	TOTAL	UNID.
			LARGO	ANCHO	ALTURA			
01.00.00	CONCRETO ALIGERADO						0.00064	m3
01.01.00	PLACA DE CONCRETO LIGERO	2	0.20	0.20	0.008	0.00064		

Figura 3.6. Metrado del conglomerado de concreto con merma de placas de poliuretano.

Fuente: Elaboración propia

3.7. Análisis de costos

Cumplir las especificaciones y los requerimientos es un factor para el éxito de un proyecto, si no es viable pues se busca otra alternativa, por lo cual el análisis de costo es importante para sopesar si las bondades que ofrecen los materiales valen el costo de oportunidad que usar otro material. Los precios del análisis para las placas de concreto ligero se observan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Análisis de precios de 2 placas de concreto ligero con merma de poliuretano

ACTIVIDADES	DESCRIPCION	COSTO (S/.)
Alquiler de equipos de medición y herramientas (APCG)	Evaluación x 2 días	2 x S/. 100.00 = S/. 200.00
Materiales para prueba (Cemento portland tipo I, arena gruesa, merma de poliuretano, arena gruesa, moldes.)	Lo asume el tesista para realizar los ensayos	S/. 6.00
Transporte, viáticos, etc, para realizar los ensayos y recolectar la información en campo.	Lo asume el tesista de su propios fondos económico	60 x S/. 10.00 = S/. 600.00
Trabajo de gabinete	Compilación, corrección tipeo e impresión de tesis-pago varios	S/. 100.00
COSTO TOTAL	Costo de Tesis(bienes y servicios)	S/. 906.00

Fuente: Elaboración propia

4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

- a) Se realizaron las pruebas respectivas en laboratorio, obteniendo un $k=0.36 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a una temperatura de 22.1°C para un conglomerado de concreto ligero con merma de placas de poliuretano.
- b) Se obtuvo la dosificación correcta del conglomerado de concreto ligero con merma de placas de poliuretano en base a sus respectivos cálculos. Dicha mezcla se colocó en un molde de 20 cm de largo x 20 cm de ancho x 0.8 cm de alto. Obteniendo dos placas de concreto ligero como muestras a analizar, dichas placas fueron puestas a secar durante una semana ya que la humedad no es conveniente para el ensayo de conductividad térmica.
- c) Se realizaron los análisis térmicos en el laboratorio de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú bajo la supervisión de la Dra. Maria Elena Lopez Herrera, mediante el uso de un APCG marca SKZ junto a las dos muestras del conglomerado, encontrando el coeficiente de conductividad térmica de $k=0.36 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a temperatura ambiente.
- d) Se hizo un análisis comparativo entre el coeficiente de conductividad térmica del conglomerado de concreto ligero de $0.36 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y el coeficiente de conductividad térmica del concreto simple a unas mismas condiciones de temperatura; comprobando que el conglomerado de concreto ligero tiene menor conductividad térmica. La merma de placas de poliuretano al ser usados como agregado incrementan el aislamiento térmico.

5. CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES

- a) Luego de terminar de colocar la mezcla en los moldes, es recomendable dejar secar la mezcla al aire libre por 7 días, para que la mezcla tome las especificaciones necesarias para proceder a los ensayos en el laboratorio. La humedad no es conveniente para el ensayo.
- b) Se recomienda respetar las normas internacionales para medición del flujo de calor unidimensional en estado permanente, que se encuentran en el ASTM C 518. Con un sistema de aislamiento de todo el sistema similar al descrito en ASTM C177.
- c) Se recomienda realizar varias tomas de datos, para poder apreciar mejor la tendencia de las curvas.
- d) Se recomienda emplear balanzas calibradas para realizar la mezcla del conglomerado de concreto con merma de placas de poliuretano.
- e) Se recomienda emplear el conglomerado de concreto ligero con merma de placas de poliuretano como complemento en revestimientos y acabados de una construcción civil.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. NORMAS:

- American Society for Testing Materials, ASTM C33 – 01.
- American Society for Testing Materials, ASTM C177 – 13.
- American Society for Testing Materials, ASTM C518 – 17.
- Normas Tecnicas Peruanas, NTP 339. 088.
- Instituto Nacional de Normas Técnicas Industriales y Certificación, INANTIC 400.037.
- Normas del Reglamento Nacional de Edificaciones, RNE E 060.

2. REVISTAS:

- **Revista IMCYC (1980).** “Estudios sobre concretos ligeros”, Recuperado el 20 de abril del 2018 de: <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Concreto%20Ligero>
- **C. Junco, J. Gadea. (2012).** “Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam”, ELSEVIER Cement & Concrete Composites 34, 1174 - 1179
- **Ozguven A, Gunduz L. (2012).** “Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate”, Cem Concr Compos, 34, 781-787.
- **Lanzon M, Garcia-Ruiz P.A. (2008).** “Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability.”, Constr Build Mater, 22 (8), 1798-1806.

- **Perez M.** “Espuma de poliuretano proyectado.”, Recuperado el 19 de abril del 2018 de: <http://reformacoruna.com/espuma-poliuretano-proyectado/>
- **PU Europe (2013).** “Aislamiento de poliuretano y gestión de residuos en el contexto de la eficiencia de recursos.”. Bruselas – Bélgica.
- **Wiki Departamento de Física Aplicada III. (2018).** “Calor y calorimetría.”. Universidad de Sevilla. Recuperado el 18 de abril del 2018 de: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor_y_calorimetr%C3%ADa
- **L. Lira – Cortez, Gonzales, Mendez-Lango. (2008).** “Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificaciones”, Simposio de Metrología, Querétaro - México.
- **L. Lira – Cortez. (1997).** “Diseño y construcción de un instrumento para medir la conductividad térmica de materiales sólidos aislantes”, ANIIM-97, Chihuahua – México.

3. LIBROS:

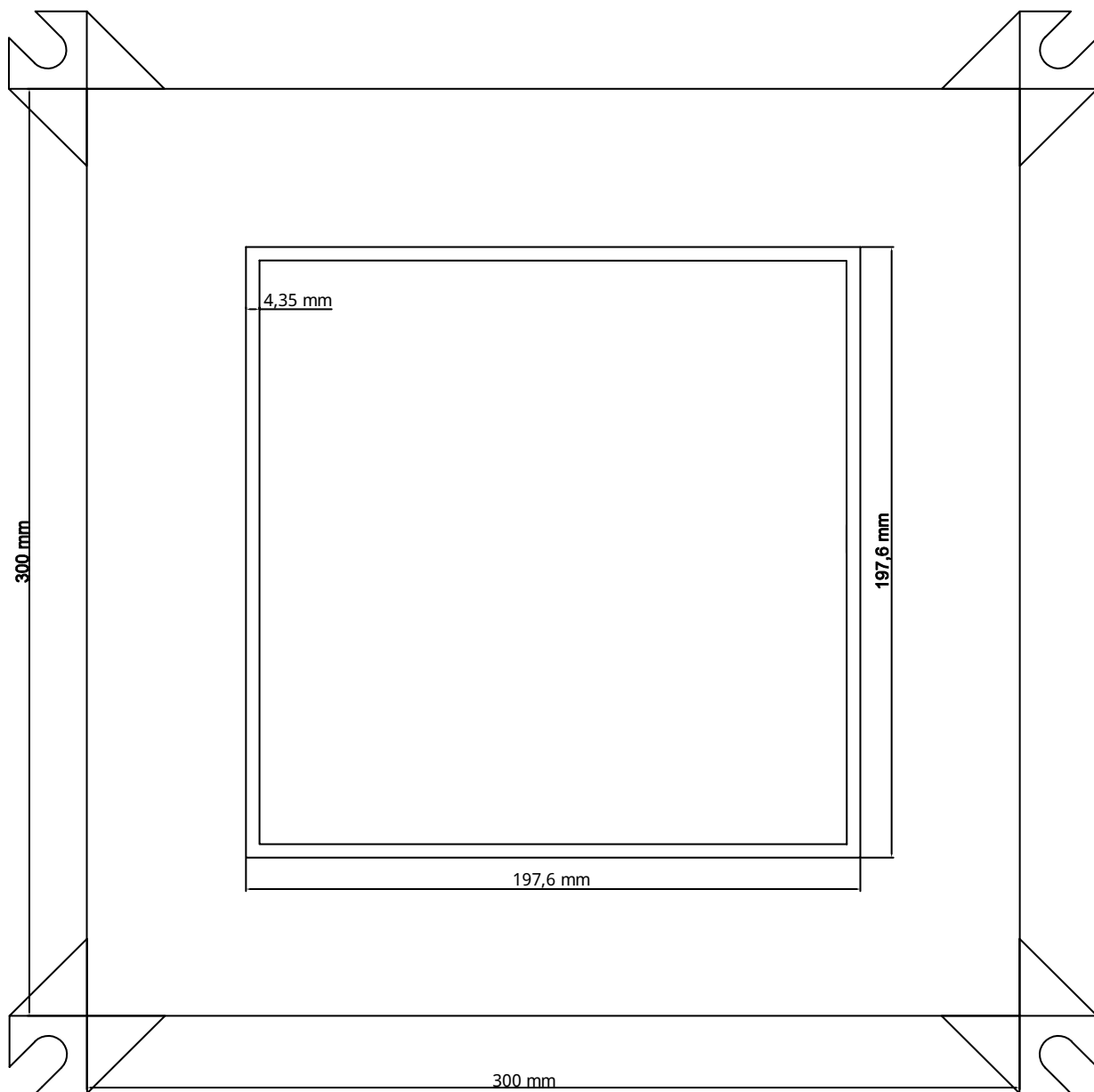
- **ABANTO CASTILLO, Flavio (1997).** “Tecnología del Concreto”. Editorial San Marcos. Lima – Perú.
- **CENGEL, Yunus (2007).** “Transferencia de Calor y Masa”. Editorial Mc Graw Hill Interamericana. D.F - México.

4. TRABAJO DE GRADO:

- **CARRILLO, Y. y LOPEZ, C. (2015).** “Diseño de concreto estructural ligero adicionando desperdicios de las ladrilleras del distrito de Santa”. Universidad Nacional del Santa. Chimbote – Perú.

- **SILVA, J. y MALDONADO, S.** “Desarrollo de un método para evaluar la conductividad en aceites vegetales y biodiesel”. Universidad Central del Ecuador – Ecuador.

ANEXOS



1	Q↑P↓Ux↑OX ot U t/D{Yàzъ
.	P↓Dъ IET 1/9EIX↑O↓MX↓
!	X P тъбъ
9	↓D P ↓ Zъ